

ВЫЯВЛЕНИЕ СКОРОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В РАЗРЕЗЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАМВАЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ

*(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;
Белорусский национальный технический университет, Минск;
Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск)*

А.А. КУСТЕНКО

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен коэффициент использования скоростного режима (КИСР) как критерий оценки эффективности трамвайного движения. Проанализированы ограничения существующих методов оценки: фрагментарность, статичность и недостаточная детализация скоростных характеристик. Разработана математическая модель расчета с учетом технических, инфраструктурных и эксплуатационных факторов. Показаны преимущества: нормированность показателя, выявление резервов эффективности, возможность диагностики узких мест. Практическое применение КИСР открывает новые возможности оптимизации трамвайных систем.

Ключевые слова: *трамвайный транспорт, КИСР, эффективность движения, скоростные характеристики, оптимизация движения, математическое моделирование, транспортное планирование, критерии оценки, городской транспорт, дорожное движение.*

Введение. Трамвайный транспорт находится в периоде активного развития в городах по всему миру, становясь важным элементом устойчивой городской мобильности. Однако эффективная интеграция трамвайных систем в существующую транспортную инфраструктуру требует точных инструментов оценки их функционирования.

Существующие критерии оценки эффективности трамвайного движения, такие как средняя и коммерческая скорость, имеют значимые ограничения. Они не позволяют выявить конкретные узкие места системы, оценить степень использования технического потенциала подвижного состава и инфраструктуры, а также не обеспечивают объективную основу для сравнения различных участков маршрутной сети.

Актуальность разработки новых подходов к оценке эффективности обусловлена необходимостью оптимизации существующих трамвайных систем и обоснования инвестиций в их развитие. Особую важность приобретает создание критериев, которые позволят количественно оценить резервы повышения эффективности и определить приоритетные направления модернизации.

Целью данного исследования является разработка коэффициента использования скоростного режима (КИСР) как инновационного критерия оценки эффективности трамвайного движения, устраняющего недостатки традиционных подходов и обеспечивающего объективную основу для оптимизации транспортных систем.

Основная часть. Современная практика оценки эффективности трамвайного движения в контексте дорожного движения базируется на нескольких группах критериев, каждая из которых отражает различные аспекты функционирования системы [1; 2].

«Пропускные» критерии составляют первую и наиболее очевидную группу показателей. Они включают в себя оценку влияния трамвайного движения на общую пропускную способность улично-дорожной сети. Основным показателем здесь выступает коэффициент снижения пропускной способности, который определяется как отношение разности между базовой пропускной способностью дороги без трамвая и фактической пропускной способностью с учетом трамвайного движения к базовой пропускной способности. Этот критерий позволяет количественно оценить «стоимость» трамвайного движения в терминах потерянной пропускной способности для автомобильного транспорта [1; 3; 4].

Временные критерии фокусируются на анализе временных характеристик движения как самих трамваев, так и других участников дорожного движения. Сюда входят показатели задержек на пересечениях, время ожидания на светофорах, продолжительность конфликтных ситуаций и пр. [5-7]. Особое внимание уделяется анализу временных потерь, возникающих в результате взаимодействия трамваев с автомобильным потоком.

Пространственные критерии оценивают эффективность использования дорожного пространства. К ним относятся показатели плотности размещения трамвайной инфраструктуры, коэффициенты использования проезжей части, анализ геометрических параметров трамвайных путей и их влияние на организацию движения других транспортных средств [8; 9].

Безопасностные критерии анализируют влияние трамвайного движения на общий уровень безопасности дорожного движения [5], т.е. статистику дорожно-транспортных происшествий с участием трамваев, анализ конфликтных точек, оценку рисков для различных категорий участников движения.

Экологические критерии в контексте дорожного движения рассматривают влияние трамвайных систем на общую экологическую обстановку в транспортных коридорах, включая изменения в структуре выбросов, уровне шума, вибрационного воздействия [6; 10–12].

Развитие методологии оценки эффективности трамвайного движения привело к формированию интегральных подходов, которые пытаются объединить различные группы критериев в единую систему оценки. Наиболее распространенными являются методы многокритериального анализа, такие как метод анализа иерархий (МАИ), метод ELECTRE, метод TOPSIS.

Однако практическое применение интегральных методов сталкивается с рядом принципиальных трудностей. Во-первых, различные критерии имеют разную размерность и не всегда поддаются прямому сравнению. Во-вторых, весовые коэффициенты, используемые для агрегирования различных показателей, часто носят субъективный характер и могут значительно варьироваться в зависимости от приоритетов различных заинтересованных сторон.

Анализ современной практики оценки эффективности трамвайного движения выявляет ряд принципиальных проблем, которые ограничивают применимость существующих критериев [13]:

1. Фрагментарность оценки. Большинство существующих критериев фокусируются на отдельных аспектах функционирования трамвайных систем, не обеспечивая целостного представления об их эффективности в контексте дорожного движения. Например, критерии пропускной способности могут показывать высокую эффективность системы, в то время как анализ временных характеристик выявляет значительные задержки для пассажиров.

2. Статичность критериев. Многие традиционные показатели основаны на усредненных значениях и не учитывают динамический характер дорожного движения. Это особенно критично для трамвайных систем, эффективность которых может существенно варьироваться в зависимости от времени суток, дня недели, сезонных факторов.

3. Недостаточная детализация скоростных характеристик в существующих подходах не позволяет выявить резервы повышения эффективности. Традиционные показатели, такие как средняя скорость или скорость сообщения, дают общее представление о функционировании системы, но не раскрывают причины снижения эффективности и не указывают на конкретные направления оптимизации.

Скорость движения трамвая является одним из наиболее важных и информативных критериев оценки эффективности трамвайного движения в контексте дорожного движения. Этот показатель интегрирует в себе влияние множественных факторов: технических характеристик подвижного состава, состояния инфраструктуры, организации дорожного движения, взаимодействия с другими участниками движения.

Скоростные характеристики трамвайного движения можно классифицировать по нескольким основаниям. По способу измерения различают мгновенную скорость, среднюю скорость на участке, скорость сообщения. По условиям движения выделяют скорость свободного движения, скорость в транспортном потоке, скорость при приоритетном движении [14].

Мгновенная скорость $V(t)$ характеризует скорость движения трамвая в конкретный момент времени и определяется как первая производная от пути по времени:

$$V(t) = \frac{ds}{dt}, \text{ м/с,}$$

где s – пройденный путь, м;
 t – время, с.

Средняя скорость на участке рассчитывается как отношение длины участка к времени его прохождения:

$$V_{cp} = \frac{L_y}{t_y}, \text{ м/с,}$$

где L_y – длина участка, м;
 t_y – время прохождения участка, с.

Скорость сообщения учитывает все остановки и задержки в процессе движения:

$$V_c = \frac{L_{общ}}{(t_{дв} + t_{ост} + t_3)}, \text{ м/с,}$$

где $L_{общ}$ – общая длина маршрута, м;
 $t_{дв}$ – время движения, с;
 $t_{ост}$ – время остановок, с;
 t_3 – время задержек, с.

Скоростные характеристики трамвайного движения формируются под воздействием комплекса взаимосвязанных факторов, которые можно разделить на несколько групп [1; 5]:

1. Технические факторы включают характеристики подвижного состава (мощность тяговых двигателей, тормозные характеристики, аэродинамические свойства), состояние рельсового пути (профиль, кривизна, состояние рельсов), системы энергоснабжения (напряжение в контактной сети, потери энергии).

2. Инфраструктурные факторы охватывают геометрические параметры трассы (продольные и поперечные уклоны, радиусы кривых), расположение остановочных пунктов, организацию пересечений с автомобильными дорогами, наличие выделенных полос для трамвайного движения.

3. Эксплуатационные факторы определяются интенсивностью движения, интервалами между трамваями, квалификацией водителей, системой управления движением, приоритетом на пересечениях.

4. Внешние факторы связаны с взаимодействием с другими участниками дорожного движения, погодными условиями, временными ограничениями (ремонтные работы, массовые мероприятия).

Традиционные показатели скорости, такие как средняя и скорость сообщения, при всей своей важности имеют ряд принципиальных ограничений, которые снижают их информативность для целей оптимизации трамвайного движения:

1. Усреднение данных приводит к потере информации о вариабельности скоростных характеристик. Два маршрута с одинаковой средней скоростью могут иметь кардинально разные профили движения: один с равномерным движением, другой с чередованием периодов высокой скорости и полных остановок.

2. Отсутствие связи с потенциалом системы не позволяет оценить, насколько эффективно используются технические возможности трамвайного подвижного состава и инфраструктуры. Коммерческая скорость 20 км/ч может быть отличным показателем для старой системы с ограниченными техническими характеристиками и неудовлетворительным для современной системы с высокими техническими возможностями.

3. Невозможность выявления узких мест в существующих показателях не позволяет определить конкретные участки или факторы, которые в наибольшей степени ограничивают скорость движения и, следовательно, требуют первоочередного внимания при оптимизации системы.

Коэффициент использования скоростного режима (КИСР) представляет собой критерий оценки эффективности трамвайного движения, который устраняет основные недостатки традиционных скоростных показателей. Этот коэффициент определяется как отношение фактической скорости сообщения трамвая между двумя остановочными пунктами к максимально возможной скорости, которую мог бы развить трамвай на данном участке при отсутствии остановок и задержек.

Концептуально КИСР отражает степень реализации скоростного потенциала трамвайной системы и позволяет оценить эффективность использования технических возможностей подвижного состава и инфраструктуры в конкретных условиях эксплуатации.

В своей простейшей форме коэффициент использования скоростного режима может быть записан как

$$K_{иср} = \frac{V_{\phi}}{V_{\max}},$$

где V_{ϕ} – фактическая скорость сообщения между остановочными пунктами;
 $V_{\max}$ – максимально возможная скорость на данном участке

Однако такая формулировка является чрезмерно упрощенной и не учитывает сложность реальных условий движения трамвая. Для практического применения необходима более детализированная математическая модель.

Для корректного расчета КИСР необходимо учесть множественные факторы, влияющие как на фактическую, так и на потенциальную скорость движения. Развернутая формула коэффициента имеет следующий вид:

$$K_{иср} = \frac{T_{ид}}{T_{\phi}},$$

где T_{ϕ} – фактическое время прохождения участка;
 $T_{ид}$ – идеальное время прохождения участка при оптимальных условиях.

Определение идеального времени движения $T_{ид}$ представляет собой сложную задачу, требующую учета технических характеристик трамвая, геометрических параметров пути и ограничений безопасности.

Идеальное время движения рассчитывается на основе оптимального профиля скорости, который включает три фазы: разгон, движение с постоянной скоростью и торможение.

Фаза разгона. Время разгона до максимальной скорости определяется тяговыми характеристиками трамвая:

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_p}, \text{ с.}$$

Путь, пройденный за время разгона:

$$S_1 = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot a_p}, \text{ м,}$$

где a_p – ускорение при разгоне, м/с².

Фаза торможения. Аналогично, время торможения

$$t_3 = \frac{V_{\max}}{a_3}, \text{ с.}$$

Путь торможения:

$$S_3 = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot a_3}, \text{ м,}$$

где a_3 – замедление при торможении, м/с².

Фаза равномерного движения. Если длина участка L превышает сумму путей разгона и торможения ($L_{\text{общ}} > S_1 + S_3$), то

$$S_2 = L_{\text{общ}} - S_1 - S_3, \text{ м,}$$

$$t_2 = \frac{S_2}{V_{\max}}, \text{ с.}$$

Общее идеальное время:

$$T_{\text{ид}} = t_1 + t_2 + t_3, \text{ с.}$$

Если длина участка недостаточна для достижения максимальной скорости ($L \leq S_1 + S_3$), то максимальная достижимая скорость определяется из условия

$$V_{\text{дос}} = \sqrt{\frac{L_{\text{общ}} \cdot a_p \cdot a_3}{a_p + a_3}}, \text{ м/с.}$$

При определении максимально возможной скорости $V_{\max}$ необходимо учитывать не только технические характеристики трамвая, но и ограничения, накладываемые инфраструктурой и условиями безопасности.

Технические ограничения подвижного состава:

$$V_{\text{техн}} = \min(V_{\text{конст}}, V_{\text{тяг}}, V_{\text{торм}}), \text{ м/с,}$$

где $V_{\text{конст}}$ – конструкционная скорость трамвая, м/с;

$V_{\text{тяг}}$ – максимальная скорость, ограниченная тяговыми характеристиками, м/с;

$V_{\text{торм}}$ – максимальная скорость, обеспечивающая безопасное торможение, м/с.

Инфраструктурные ограничения:

$$V_{\text{инфр}} = \min(V_{\text{рад}}, V_{\text{укл}}, V_{\text{путь}}), \text{ м/с,}$$

где $V_{\text{рад}}$ – скорость, ограниченная минимальным радиусом кривых на участке, м/с;

$V_{\text{укл}}$ – скорость, ограниченная максимальным продольным уклоном, м/с;

$V_{\text{путь}}$ – скорость, ограниченная состоянием рельсового пути, м/с.

Эксплуатационные ограничения:

$$V_{\text{эсп}} = \min(V_{\text{без}}, V_{\text{комф}}, V_{\text{регл}}), \text{ м/с,}$$

где $V_{\text{без}}$ – скорость, обеспечивающая безопасность движения, м/с;

$V_{\text{комф}}$ – скорость, обеспечивающая комфорт пассажиров, м/с;

$V_{\text{регл}}$ – скорость, установленная эксплуатационными регламентами, м/с.

Итоговая максимальная скорость определяется как

$$V_{\max} = \min(V_{\text{техн}}, V_{\text{инфр}}, V_{\text{эсп}}), \text{ м/с.}$$

Базовая формула КИСП может быть модифицирована для учета специфических условий эксплуатации и целей анализа.

КИСП с учетом весовых коэффициентов. Для участков с различной значимостью в общей структуре маршрута может применяться взвешенная формула

$$K_{иср} = \frac{\sum_{i=1}^{ny} (w_i \cdot K_{исрi})}{\sum_{i=1}^{ny} w_i},$$

где w_i – весовой коэффициент i -го участка;

$K_{исрi}$ – коэффициент для i -го участка.

КИСП с учетом временной динамики представляет собой адаптивную модификацию показателя, позволяющую анализировать изменение эффективности во времени с использованием методов экспоненциального сглаживания.

Формула обеспечивает плавное отслеживание тенденций изменения эффективности с возможностью настройки чувствительности к новым данным через коэффициент сглаживания α :

$$K_{иср}(t) = \alpha \cdot K_{иср.тек} + (1 - \alpha) \cdot K_{иср.пред},$$

где α – коэффициент сглаживания ($0 < \alpha < 1$).

Коэффициент сглаживания α определяет степень влияния текущих измерений на сглаженное значение КИСП. При α , близком к 1 (например, $\alpha = 0,9$), система быстро реагирует на изменения, что подходит для оперативного мониторинга и быстрого выявления отклонений от нормального режима работы. При α , близком к 0 (например, $\alpha = 0,1$), система медленно реагирует на изменения, что обеспечивает стабильность показателя и подходит для долгосрочного анализа трендов.

Выбор оптимального значения коэффициента сглаживания зависит от целей анализа и характеристик данных. Для систем с высокой вариабельностью КИСП рекомендуется использовать меньшие значения α (0,1–0,3) для снижения влияния случайных колебаний. Для стабильных систем с редкими значительными изменениями целесообразно использовать большие значения α (0,7–0,9) для быстрого выявления отклонений.

Математическое обоснование выбора коэффициента сглаживания может основываться на минимизации среднеквадратичной ошибки прогноза:

$$\alpha_{опт} = \arg \min \sum (K_{иср.факт}(t) - K_{иср.прог}(t))^2,$$

где $\arg \min$ – значение переменной (в данном случае α), при котором функция достигает минимального значения;

$\sum (K_{иср.факт}(t) - K_{иср.прог}(t))^2$ – сумма квадратов ошибок прогноза.

Данный подход позволяет определить оптимальное значение α для конкретной трамвайной системы на основе статистических данных.

Практическое применение динамического КИСП включает создание адаптивных систем мониторинга, способных автоматически корректировать пороговые значения и критерии оценки эффективности в зависимости от текущих условий эксплуатации. Система может автоматически увеличивать чувствительность мониторинга при обнаружении тенденции к снижению эффективности или, наоборот, снижать чувствительность в периоды стабильной работы.

КИСП с учетом пассажиропотока представляет собой модификацию базового показателя, учитывающую влияние загрузки трамвая на его скоростные характеристики:

$$K_{иср.заг} = K_{иср.баз} \cdot (1 - \beta \cdot \gamma_z),$$

где β – коэффициент влияния загрузки;

γ_z – коэффициент загрузки вагона.

Коэффициент загрузки вагона определяется как отношение фактического количества пассажиров к номинальной вместимости:

$$\gamma_z = \frac{q_{\phi}}{q_n},$$

где q_{ϕ} – фактическое количество пассажиров, пасс.;

q_n – номинальная вместимость вагона, пасс.

Значения коэффициента загрузки могут превышать единицу в случае переполнения вагона, что характерно для часов пик в крупных городах.

Коэффициент влияния загрузки β определяется экспериментально для каждого типа трамвая и может варьироваться в зависимости от конструктивных особенностей вагонов. Для современных низкопольных трамваев значения β можно допустить в диапазоне 0,15–0,25, что означает снижение КИСП на 15–25% при полной загрузке вагона. Для старых высокопольных трамваев значения β могут достигать 0,35–0,45 из-за менее эффективной планировки салона и более медленного процесса посадки-высадки пассажиров [15].

Физическое обоснование влияния загрузки на КИСП связано с несколькими факторами. Увеличение массы транспортного средства при росте пассажиропотока приводит к снижению ускорения и увеличению тормозного пути, что непосредственно влияет на скоростные характеристики. Время стоянок на остановках увеличивается пропорционально количеству пассажиров, осуществляющих посадку и высадку. Переполнение вагона может приводить к задержкам закрытия дверей и дополнительным остановкам для регулирования пассажиропотока. Это не может сказаться на стоимости услуги [16].

Значения коэффициента использования скоростного режима могут интерпретироваться следующим образом:

- КИСП = 1,0 – идеальные условия эксплуатации, полное использование скоростного потенциала системы. На практике такие значения недостижимы из-за неизбежных эксплуатационных ограничений.
- КИСП = 0,8–0,9 – отличные условия эксплуатации, высокоэффективное использование скоростного потенциала.
- КИСП = 0,6–0,8 – хорошие условия эксплуатации, удовлетворительное использование скоростного потенциала.
- КИСП = 0,4–0,6 – удовлетворительные условия эксплуатации, значительные резервы повышения эффективности.
- КИСП < 0,4 – неудовлетворительные условия эксплуатации, критически низкое использование скоростного потенциала. Требуется немедленных мер по оптимизации системы.

Коэффициент использования скоростного режима может применяться для решения широкого спектра задач планирования и оптимизации трамвайного движения:

- диагностики узких мест: анализ значений КИСП по отдельным участкам маршрута позволяет выявить участки с наиболее низкой эффективностью использования скоростного потенциала и сосредоточить усилия по оптимизации именно на этих участках;
- сравнительного анализа маршрутов: КИСП обеспечивает объективную основу для сравнения эффективности различных маршрутов, независимо от их технических характеристик и условий эксплуатации;
- оценки эффективности мероприятий: изменение значений КИСП до и после реализации мероприятий по оптимизации (введение приоритета на светофорах, выделение полос движения, модернизация подвижного состава) позволяет количественно оценить их эффективность;
- планирования развития системы: КИСП может использоваться для прогнозирования эффективности планируемых трамвайных линий и оптимизации их параметров на стадии проектирования.

Преимущества КИСП перед традиционными критериями:

1. Нормированность показателя.

Одним из ключевых преимуществ КИСП является его нормированность. Значения коэффициента всегда находятся в диапазоне от 0 до 1, что обеспечивает:

- универсальность сравнений – возможность сравнения участков с различными техническими характеристиками;
- интуитивную понятность – значение 0,8 означает использование 80% скоростного потенциала;
- простоту агрегирования – возможность вычисления средних значений без потери смысла.

2. Выявление резервов эффективности.

КИСП позволяет количественно оценить неиспользованный потенциал системы:

$$\%V_{рез} = (1 - K_{иср}) \cdot 100\%.$$

В отличие от статических показателей средней скорости, КИСП может рассчитываться для различных временных интервалов и условий:

- почасовой анализ – выявление периодов с низкой эффективностью;
- сезонный анализ – учет влияния погодных условий;
- ситуационный анализ – оценка влияния различных факторов.

Направления развития:

1. Интеграция с системами искусственного интеллекта может обеспечить автоматический расчет оптимальных профилей скорости с учетом текущих условий движения и прогнозирования изменений.
2. Развитие концепции адаптивного КИСП предполагает динамическое изменение целевых значений коэффициента в зависимости от условий эксплуатации и приоритетов системы.
3. Интеграция с концепцией «умного города» позволит использовать КИСП как один из ключевых показателей эффективности городской мобильности в целом.

Заключение. Коэффициент использования скоростного режима представляет собой инновационный и высокоинформативный критерий оценки эффективности трамвайного движения в контексте дорожного движения. Его математическая основа, базирующаяся на сравнении фактических и потенциальных скоростных характеристик, обеспечивает объективную оценку эффективности использования технических возможностей трамвайных систем.

Практическое применение КИСР открывает новые возможности для оптимизации трамвайного движения, позволяя выявлять узкие места, оценивать эффективность мероприятий по улучшению и устанавливать обоснованные целевые показатели развития системы. Нормированный характер показателя обеспечивает универсальность его применения для различных типов трамвайных систем и условий эксплуатации.

Дальнейшее развитие концепции КИСР в направлении интеграции с современными информационными технологиями и системами управления городским транспортом может существенно повысить эффективность планирования и эксплуатации трамвайных систем, способствуя их более широкому внедрению в качестве экологически чистого и эффективного вида городского транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вучик В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина; под науч. ред. М. Блинкина. – М.: Территория будущего, 2011. – 576 с.
2. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
3. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Опасности в дорожном движении. – М.: Новое знание, 2013. – 244 с.
4. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Водителю о дорожном движении. – 3-е изд., дораб. – Минск: БНТУ, 2010. – 139 с.
5. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
6. Капский Д.В. Экологические потери в дорожном движении // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2014. – № 3(63). – С. 163–167.
7. Чикишев Е.М., Капский Д.В., Семченков С.С. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 48–59. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-23-1-48-59
8. Капский Д.В. Транспорт в планировке городов. – Минск: БНТУ, 2023. – 571 с.
9. Капский Д.В. Роль организации дорожного движения в транспортной системе города // Транспорт и сервис. – 2014. – № 2. – С. 47–51.
10. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д.В. Капский, В.Н. Кузьменко, А.С. Красильникова и др. // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157
11. Ярошевич В.К., Седюкевич В.Н., Капский Д.В. Оценка экологических потерь при организации автомобильных перевозок // Вестник БНТУ. – 2006. – № 5. – С. 61–62.
12. Кухаренок Г.М., Капский Д.В. Разработка методики определения экологических потерь в дорожном движении // Вестник БНТУ. – 2005. – № 6. – С. 58–61.
13. Капский Д.В. Повышение качества дорожного движения в городах // Транспортные системы мегаполисов. Проблемы и пути решения: тр. Междунар. науч.-практ. конф. / Харьков (11–12 окт. 2011 г.) / редкол.: А.Н. Туренко [и др.]. – Харьков, 2011. – С. 20–26.
14. Сафронов Э.А., Сафронов К.Э. Инновационные методы повышения эффективности транспортных систем городов // Вестник МАДИ. – № 3(26). – 2011. – С. 7–12.
15. Минко И.С. Анализ деятельности производственных систем: учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО: ИХиБТ, 2014. – 45 с.
16. Изменение параметров городской транспортной системы при введении платы с владельцев автомобилей за использование улично-дорожной сети и варьировании стоимости проезда в общественном транспорте / Д.А. Захаров, Е.М. Чикишев, Д.В. Капский и др. // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 336–344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344

REFERENCES

1. Vuchik, V. R. (2011). *Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni* (A. Kalinin (Trans.); M. Blinkin (Ed.)). Moscow: Territoriya budushchego. (In Russ.).
2. Vrubel', Yu.A. (2003). *Poteri v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
3. Vrubel', Yu.A. & Kapskii, D.V. (2013). *Opasnosti v dorozhnom dvizhenii*. Moscow: Novoe znanie. (In Russ.).
4. Vrubel', Yu.A. & Kapskii, D.V. (2010). *Voditelyu o dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
5. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovaniye aviariynosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Kapskii, D.V. (2014). *Ekologicheskie poteri v dorozhnom dvizhenii* [Environmental losses in road traffic]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov], 3(63), 163–167. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Chikishev, E.M., Kapskii, D.V. & Semchenkov, S.S. (2023). *Otsenka vliyaniya transportnykh i prirodno-klimaticheskikh faktorov na uroven' raskhoda elektroenergii elektrobusev v usloviyakh gorodskoi sredy* [Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment.]. *Nauka i tekhnika* [Science & Technique], 22(1), 48–59. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-23-1-48-59 (In Russ., in Engl.).
8. Kapskii, D.V. (2023). *Transport v planirovke gorodov*. Minsk: BNTU. (In Russ.).

9. Kapskii, D.V. (2014). Rol' organizatsii dorozhnogo dvizheniya v transportnoi sisteme goroda [Role of the organization of road traffic in transport system of the city]. *Transport i servis [Transport & service]*, (2), 47–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Kapskii, D.B., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Semchenkov, S.S., Kot, E.N. & Larin, O.N. (2022). Analiz razvitiya razlichnykh vidov gorodskogo elektricheskogo transporta v Polotske i Novopolotske [Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21(2), 150–157. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157 (In Russ., in Engl.).
11. Yaroshevich, V.K., Sedyukevich, V.N. & Kapskii, D.V. (2006). Otsenka ekologicheskikh poter' pri organizatsii avtomobil'nykh perevozok. *Vestnik BNTU*, (5), 61–62. (In Russ.).
12. Kukharenek, G.M. & Kapskii, D.V. (2005). Razrabotka metodiki opredeleniya ekologicheskikh poter' v dorozhnom dvizhenii. *Vestnik BNTU*, (5), 58–61. (In Russ.).
13. Kapskii, D.V. (2011). Povyshenie kachestva dorozhnogo dvizheniya v gorodakh. *Transportnye sistemy megapolisov. Problemy i puti resheniya: tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Khar'kov (11–12 okt. 2011 g.)* (20–26). Khar'kov: Khar'kov. nats. avtomobil'nodorozhnyi un-t. (In Russ.).
14. Safronov, E.A. & Safronov, K.E. (2011). Innovatsionnye metody povysheniya effektivnosti transportnykh sistem gorodov [Innovative methods of increase of efficiency of transport researches]. *Vestnik MADI [MADI Bulletin]*, 3(26), 7–12. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Minko, I.S. (2014). *Analiz deyatel'nosti proizvodstvennykh sistem*. Saint Petersburg: NIU ITMO: IKhiBT. (In Russ.).
16. Zakharov, D.A., Chikishev, E.M., Kapskii, D.V. & Skirkovskii, S.V. (2024). Izmenenie parametrov gorodskoi transportnoi sistemy pri vvedenii platy s vladel'tsev avtomobilei za ispol'zovanie ulichno-dorozhnoi seti i var'irovaniy stoimosti proezda v obshchestvennom transporte [Changing the Parameters of the Urban Transport System with Introduction of Fees from Car Owners for Using the Road Network and Variations in Public Transport Fare]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 23(4), 336–344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344 (In Russ., in Engl.).

Поступила 11.06.2025

IDENTIFICATION OF SPEED POTENTIAL IN THE CONTEXT OF TRAM TRAFFIC EFFICIENCY

D. KAPSKI

(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;

Belarusian National Technical University, Minsk;

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk)

A. KUSTENKA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents such a criterion for evaluating tram traffic efficiency as the speed regime utilization coefficient (SRUC). The limitations of existing evaluation methods are analyzed: fragmentation, static nature, and insufficient detail of speed characteristics. A mathematical calculation model has been developed taking into account technical, infrastructural, and operational factors. The advantages are shown: normalized indicator, identification of efficiency reserves, possibility of bottleneck diagnostics. Practical application of SRUC opens new opportunities for tram system optimization.

Keywords: tram transport, SRUC, traffic efficiency, speed characteristics, traffic optimization, mathematical modeling, transport planning, evaluation criteria, urban transport, road traffic.